DOI: 10.5846/stxb201704070598
蔺鹏飞,朱喜,何志斌,杜军,陈龙飞.土壤水分时间稳定性研究进展.生态学报,2018,38(10):3403-3413.
Lin P F, Zhu X, He Z B, Du J, Chen L F.Research progress on soil moisture temporal stability.Acta Ecologica Sinica,2018,38(10):3403-3413.

土壤水分时间稳定性研究进展

蔺鹏飞[1,2],朱　喜[1,2],何志斌[1,*],杜　军[1],陈龙飞[1]
1 中国科学院西北生态环境资源研究院临泽内陆河流域研究站,中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室,兰州　730000
2 中国科学院大学,北京　100049

摘要:土壤水分是陆地生态系统中不可或缺的组成部分,在地表水文过程中起着关键作用,连接着一系列的水文、生态、气候和地质学过程,是陆地生态系统健康运行的关键。以土壤水分时间稳定性概念为主线,从时间稳定性概念、研究方法、应用和影响因素等方面,系统阐述了土壤水分时间稳定性近年来的研究进展,探讨了代表性测点的选取标准以及土壤水分时间稳定性的影响因素。结合目前的研究进展,提出了未来的研究重点:加强多因素综合作用对土壤水分时间稳定性的研究;结合"3S"技术、计算机模拟和野外实测来研究时间稳定性的尺度问题;如何高效选择代表性测点;探讨时间稳定性概念在植被恢复区和气候敏感区的研究与应用。

关键词:土壤含水量;时间稳定性;代表性测点;应用;影响因素

Research progress on soil moisture temporal stability

LIN Pengfei[1,2], ZHU Xi[1,2], HE Zhibin[1,*], DU Jun[1], CHEN Longfei[1]
1 *Linze Inland River Basin Research Station, Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Eco-hydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resource, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou* 730000, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: As an integral part of terrestrial ecosystem and the core of the surface hydrological cycle, soil water connected to a series of hydrology, geology, climate and ecological processes, which is a key part for the healthy operation of the terrestrial ecosystem. Based on the concept of soil moisture temporal stability, we expounded the research progress of the soil moisture temporal stability from the concept of time stability, research methods, its application and influencing factors, and analyzed the selection criteria of the representative point, and the factors affecting the time stability of the soil moisture. In addition, combined with the current research progress, the research emphases in the future are put forward: strengthening the research on the comprehensive function of many factors on the time stability of soil water content; studying the scale problem of the time stability by combining with "3S" technology, computer simulation and field measurement; choosing the representative points effectively; and conducting the research and application of time stability concept in vegetation restoration and climate sensitive areas.

Key Words: soil water content; temporal stability; representative sites; applications; influence factors

土壤水分是一个综合的状态变量,连接着一系列的水文、生态、气候和地质学过程,如:径流产生、蒸散发、能量分配、溶质运移和地表物质能量交换等过程[1-9]。不同土层的土壤水分往往表现出不同的水文过程和生

基金项目:国家自然科学优秀青年科学基金项目(41522102);国家自然科学青年基金项目(41601051,41701296)
收稿日期:2017-04-07;　　**网络出版日期**:2018-02-01

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: hzbmail@lzb.ac.cn

态功能[10]。表层或者浅层土壤水分通常是植被生长的常用水分来源,受到降水入渗和蒸散发的强烈影响,而深层土壤水分通常发挥“土壤水库”的作用。在水分限制的生态系统中,土壤水分是植被恢复重建、水资源管理和农业生产的主要限制因子[11-13]。在干旱区山地,土壤水分尤为重要,特别是会影响山区径流的产生[14]。量化不同时空角度的土壤水分不但在理论和实践当中具有重要的应用[15],而且可以在植被恢复过程中为目标物种提供最佳空间位置提供一定的理论依据[16]。因此,了解土壤水分及其时空动态变化对农林业可持续发展、水土保持以及水资源的高效管理具有重要的意义[17]。

土壤水分时空变异性受到众多因素的影响,包括气候[18-19]、地形[20]、土层深度[5,21-22]、植被类型[23-26]、以及土地利用和土地覆盖状况[27-30]等。同时由于其对不同控制因子和过程的强烈的非线性和复杂的反馈机制,土壤水分表现出强烈的时空变异性[31-32]。因此,在水文和土壤科学中准确量化土壤水分特征仍然是一个重大的挑战[33]。

在现有的土壤水分数据获取方法中,手动或者是原位自动观测数据被认为是最直接而且最为精确的数据[34]。然而,传统的原位观测不但费时费力,而且仅能够提供一些被选择点的信息。遥感技术是一种快速和高效获得较大尺度上土壤水分的方法[35-36],但由于其获取的土壤水分信息具有较粗的时空分辨率并且对地面粗糙度、植被以及地形的失真效应极为敏感,因此该技术在验证或者校正过程中也存在一些困难[37-40]。而通过传统的方法(如称重法,时域反射仪,频率反射仪和中子管法)进行遥感数据验证则需要大量的原位采样,这样不但费时费力而且很难用于监测较大区域的土壤水分[41]。因此,探索能够优化采样点的数目并且能够快速准确估计样地平均土壤水分的方法是非常的必要的。为了实现这个目标,科学家们进行了各种尝试,其中之一就是土壤水分稳定性研究。当前土壤水分稳定性研究已经获得了大量的证实,利用时间稳定性概念指导相应的实践活动可以大大的节省财力和物力。因此,以土壤水分时间稳定性概念为主线,强调气候-地形-土壤-植被等因素的有机结合,系统研究不同植被类型土壤水分时间稳定性特征以及影响因素在不同尺度上的差异,从而更加深入地认识和了解土壤水分稳定性概念的研究与应用,并探讨如何利用代表性测点准确预估不同尺度各种生态系统的平均土壤水分含量,是植被恢复重建、农业生产和水资源管理所需的有效手段。本文在总结国内外已有研究的基础上,从时间稳定性概念、研究方法、应用和影响因素等方面,综述了土壤水分稳定性近年来的研究进展,并展望了未来研究应重点关注的科学问题。

1 时间稳定性概念提出及研究方法

1.1 时间稳定性概念的提出

过去近半个世纪以来,土壤水分时空变化在不同尺度不同生态系统类型当中已经得到了广泛的研究[8,34,42-44]。同时研究也发现由于强烈的时空变异性,根据经典统计理论掌握土壤水分信息需要搜集大量的样品,这样不但费时费力而且花费巨大的财力。因此,研究者便开始思考如何快速地获取一个区域的平均土壤水分状况。在这种需求下,时间稳定性的概念从大量时空变异的研究中应运而生。Vachaud 等[45]首先发现并提出了时间稳定性概念,他们在 3 个试验地(草地、橄榄树和小麦)土壤水分的研究过程中发现,如果把所有测定点从小到大排列起来,一些样点每次测量总是能够很好地代表试验地的平均土壤水分,而另外一些样点每次测量总是高于或者低于整个样地的平均土壤水分,这种土壤水分空间模式随着时间变化的相似性就称为时间稳定性现象(Temporal stability)。此后,虽然时间稳定性概念也被一些学者用来检验土壤水分空间模式在时间上是否具有持续性[46-47],然而土壤水分时间稳定性现象还是被广泛的学者所认可[37,48-51]。根据不同的表达方式,一些类似的术语如“时间稳定性”(Time stability)、“时间持续性”(Temporal persistence)、“秩稳定性”(Rank stability)或“顺序稳定性”(Order stability)等也被用于相关研究当中[12,52-53],但后续的研究还是更多地沿用了“Temporal stability”这一名词[37,54-56]。

1.2 时间稳定性研究方法

目前,时间稳定性研究方法主要有 3 种:一是相对差分法[45],公式 1 为样点 i 在时间 j,土层深度 k 的土壤

水分(θ_{ijk})的相对差分值,公式 2 为所有样点在 j 时间 k 土层深度的土壤水分的平均值;然后利用公式 3 和式 4 计算获得各个样点的相对差分(MRD)和相对差分的标准差(SDRD),然后把所有样点按照 MRD 由小到大的顺序排列起来,并标注出每一个样点的 SDRD,通过这种方式可以很容易地找到哪些样点一致地高于均值,哪些样点一致地低于均值,哪些样点总能够一致地代表研究区的均值;第二种方法是 Spearman 秩序相关系数法[45],主要反映测量样点的空间模式在时间上的相似性,利用式 5 计算出各个测定时间之间的秩序相关系数(r_s),其值越接近于 1 说明土壤水分的空间模式在时间上越相似,即土壤水分的时间稳定性越强;第三种方法是累计概率函数[45],通过计算不同测定时间的累计概率函数,通过分析不同测定时间各测点土壤水分累计概率的相似性来判断时间稳定性的强弱。如果一些样点的含水量在不同水分状况下都正好等于或接近于 50%,那么这些样点就是可以用来代表平均土壤水分状况的代表性测点。此外,赵培培[57]还用谱分析的方法研究了时间稳定性,并发现数据的"异常值"不影响谱特征,但是却会降低 Spearman 秩相关系数。相对而言,Spearman 秩相关系数和相对差分的方法被更加广泛地用于土壤水分时间稳定性的研究中[1,37,51, 56]。SDRD 和 r_s 是判定时间稳定性的两个最重要的指标,但是两者之间又有明显的差异,前者表示具体样点时间上的稳定性,而后者是指所有样点空间模式在时间上的相似性,SDRD 越小说明样点的时间稳定性越强,而 r_s 越接近于 1,表明土壤水分的空间模式在不同时间上越相似[58]。

$$\delta_{ijk} = \frac{\theta_{ijk} - \overline{\theta_{jk}}}{\overline{\theta_{jk}}} \tag{1}$$

$$\overline{\theta_{jk}} = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\theta_{ijk} \tag{2}$$

$$\overline{\delta_{ik}} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\delta_{ijk} \tag{3}$$

$$\sigma(\delta_{ik}) = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{j=1}^{N}(\delta_{ijk} - \overline{\delta_{ik}})^2} \tag{4}$$

式中, N 为土壤水分观测次数, M 为观测点总数, i 为测点位置, k 为土层深度, $\overline{\theta_{jk}}$ 为研究区时间 j 的所有测量值的均值, $\overline{\delta_{ik}}$ 和 $\sigma(\delta_{ik})$ 分别为所有测量时间 j 内各测量点的平均相对差分和平均相对差分的标准差。

$$r_s = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{N}(R_{ij} - R_{ij'})^2}{n(n^2 - 1)} \tag{5}$$

r_s 为 Spearman 秩相关系数,表示土壤水分分布格局在不同时刻的相似性,式中 n 为样点总数, R_{ij} 是在位置 i 和时间 j 观测值的秩,而 $R_{ij'}$ 则是观测值在同一个测量点 i 而在不同时间 j' 的秩。

1.3　代表性测点的选择指标

代表性测点通常指在整个观测区域接近于平均土壤水分的点或者能够很容易地获得观测区域平均土壤水分的点[59]。用代表性测点对研究区平均水分进行预测是时间稳定性概念最重要的应用之一,准确便捷地选择出代表性测点是其关键所在。找到代表性测点可以以很小的代价获取大区域平均土壤水分状况的信息。Schneider 等[55]更进一步指出选出的代表性测点可以用来对研究区域的土壤水分状况进行多年预测。目前,选择代表性测点的指标或方法主要有以下四个:一是,根据 Vachaud 等[45],MRD 接近于零并且 SDRD 也比较小的样点是代表性测点,但是 MRD 接近于零的样点其 SDRD 并不一定小,用这种方法选择代表性测点的过程具有一定的主观性,并且仅从这个指标不能直接得到预测的精度[60];二是,具有最小 SDRD 的样点是代表性测点[61],假设存在相对差分平均值为 $\overline{\delta_{ik}}$ 的时间稳定性点[17,62],然后再通过 $\overline{\delta_{ik}}$ 进行转化得到研究区的平均值。三是,Hu 等[60]从误差最低的角度出发提出了用估计误差绝对值的均值(MABE)判断代表性测点,利用式 6 计算出各样点的 MABE,他们认为其值越低,预测的精度越高。四是,研究者为了克服方法一和方法二的

不足,一些学者[63-64]提出将 MRD 和 SDRD 两个指标按照式 7 联合起来作为一个新的指标,称为时间稳定性指标(ITS)。高磊[65]认为该方法是对代表性测点选择标准的一个有益补充,有助于优化代表性测点选择的标准,但是这个指标将 MRD 和 SDRD 对间稳定性测定的影响视为一致的做法有待商榷。

$$MABE_{ik} = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N}\left|\frac{\delta_{ijk} - \overline{\delta_{ik}}}{1 + \overline{\delta_{ik}}}\right| \tag{6}$$

$$ITS_{ik} = \sqrt{\overline{\delta_{ik}}^{2} + \sigma(\delta_{ik})^{2}} \tag{7}$$

目前还没有一个公认的代表性测点的选择标准,大部分研究者选择使用第一种方法。通过第一种方法鉴定的代表性测点可以直接用来预测研究区的平均水分状况并且已经在不同研究区得到成功应用[37,49,66-67],而其他的三种方法虽有各自的优点但同时也存在自身的缺点,并且还没有被大量研究所证实具有更高的预测精度。以上四种鉴定代表性测点的方法都是基于前期大量土壤水分实测数据,一般来说,应该在一年的测量周期内比较平均地测定 13—15 次,显然,鉴定代表性测点的前期工作也是非常繁琐的。因此,在研究过程中,研究者对所选择的代表性测点所具备的特征给予了特别的注意,比如,这些测点的土壤质地,在坡面的位置等,希望能通过这些简单观测找到代表性测点的共性,以省去前期大量的测定工作。因此,这种先验地鉴定代表性测点的方法有着很大的实用价值[61,63,68]。

2 土壤水分时间稳定性应用

时间稳定性概念已被许多学者广泛认识并应用于土壤水分的研究之中[13, 39,49,63, 68]。除了土壤含水量外,土壤储水量和土壤水势也具有时间稳定性特征[45,54,68-70]。时间稳定性概念主要有 3 个方面应用:一是找出研究区域内稳定的代表性样点,并在不同时刻利用这些样点直接或间接预测或估计研究区域的平均土壤水分状况以及对土壤水分进行尺度推绎[13,49,56,58,61,71-73];二是利用时间稳定性概念进行插值获得由于仪器故障而缺失的土壤水分数据[57,74-75];三是验证或者校正遥感手段获得的土壤水分数据[1,25,55,64]。目前,时间稳定性概念已被广泛应用于各种土地利用类型,例如草地生态系统[45,55,63],农地生态系统[51,54],林地生态系统[76]和农林复合生态系统[77-78];以及不同气候环境区,例如干旱半干旱气候区[31,63,68,79],半湿润气候区[37,62]和湿润气候区[64]。Liwata 等[80]更是在北半球(60-68° N)梯度上研究了土壤水分的稳定性。此外,该概念也已被应用于不同土层深度[62,80],不同尺度[31,51,56,81],不同的测定时段[54,63,82-83]以及不同的测定仪器[8,64,72,84]所获得的土壤水分的研究,并取得了重要进展。

鉴定代表性测点来预测研究区的平均土壤水分状况已经成为时间稳定性概念最重要的应用之一[60]。由于代表性测点可以预测研究区的平均土壤水分,因而在需要获取土壤水分均值的情况下,不再需要大范围的采样,而只需在特定的时间点去测定代表性测点的土壤水分即可,这样可以节省大量的人力和物力。朱青等[85]在土壤水分时间稳定性和层次聚类分析的基础上,选取典型监测样点组合,采用逐步多元线性回归构建各样点土壤含水量与典型监测样点土壤含水量的定量关系,并利用其预测不同时期各样点的土壤含水量,发现该土壤水分优化监测方法可以在大大削减野外监测工作量的同时保证监测的效率。Kamgar 等[47]在一个 12 m×15 m 的小区尺度高密度布设了 200 个测量点,比较了用自举算法(Bootstrapping)和时间稳定性概念两种方法研究预测平均土壤水储量所需的最小样本数,结果发现第一种方法最少需要收集 10 个样本而后者只需要 3 个。不过代表性测点的个数因不同的研究区而异,如一个、两个、甚至多个[48,60,86]。Vanderlinden 等[70]研究发现找到一个可以代表不同土壤深度水分状况的代表稳定性点比较困难。Tallon 和 Si[12]仅发现一个测点可以同时代表两个土层深度的平均土壤水分状况,而 Gao 和 Shao[58]却没有找到一个测点可以同时代表 3 个土层的平均土壤水分状况。Gube 等[54]发现土壤水分代表稳定性测点随土壤深度而异。Jia 等[81]在黄土高原一个典型坡面 HB 上发现单一代表性测点可以代表 0—1,1—2 m 和 2—3 m 3 个土层深度的平均土壤水分状况,然而,相邻坡面 HA 没有发现类似代表性样点,这可能与坡面 HB 土地利用和植被分布较 HA 更加单一

有关。另外,Penna 等[84]和 Wang 等[8]的研究也发现一个代表性测点可以同时代表多个土层深度的平均土壤水分状况。

一般情况下,代表性测点都具有相对平均的坡向、坡度和海拔等特征[25,61]。Gao 等[56]指出估计平均土壤水分的最佳测点位置应该具有相对高的粘粒含量、坡度平缓、并且地表相对较平,该结果在美国 Walnut Creek 流域也得到了证实[64]。Jacobs 等[64]和 Martinez 等[59]也发现最稳定的测点拥有中等或者相对高的粘粒含量。但是,目前基于土壤水分的相关变量来先验地鉴定代表性的测点还没有定论,研究者之间的发现甚至是相互矛盾的。例如,da Silv 等[50]发现粘粒含量和有机质含量比与地形相关的变量能更好地鉴定土壤水含量代表性测点,相反,另外的研究却发现地形和植被变量而不是土壤质地对于鉴定代表性测点更加重要[68,73]。Mohant 和 Skaggs[1]认为土壤水分在沙壤土比粉壤土有更好的时间稳定性,而 Jacobs 等[64]发现具有中等到中等偏高的粘粒含量(28%—30%)的样点可以代表研究区的平均土壤水分状况。Hu 等[31]却在同一个流域在流域尺度上发现土壤质地是土壤水分稳定性的主要控制因子,而 Schneider 等[55]认为土壤特性不能完全反映代表性测点的特征。总之,土壤水分时间稳定测点已经被证明可以应用于土壤水分的监测,因此如何更加高效地选出最优的代表性测点将是下一步工作的重点之一。

3　土壤水分时间稳定性的影响因素

能很好地预测研究区平均土壤水分含量的测点是那些能代表流域平均特征的样点[25,61],特别是那些与土壤水分密切相关的特征,这是因为土壤水分与不同特征之间的相关性不同,因此,明确土壤水分时间稳定性指标的影响因素是先验鉴定土壤水分代表性测点的前提条件。土壤水分时间稳定性特征受多种因素影响,例如土壤性质、地形因子、植被属性、气候因素等[37, 60-61, 68,73]。揭示不同尺度土壤水分时间稳定性与各种影响因素的关系,将有助于研究区稳定代表性样点的确定和预估其他研究区土壤水分状况[70]。然而,由于研究区域、采样尺度、采样时间等的不同,目前关于以上因素对土壤水分时间稳定性的影响并没有统一的结论[87]。在地形复杂的区域,相对海拔对时间稳定性具有强烈的影响[25,37,58, 61,81],而在地形相对平坦的区域,地形对土壤水分影响很小或者没有影响[49,63]。土壤属性对土壤水分的重要作用主要是通过土壤颗粒组成、有机质含量和土壤结构等能改变土壤的持水和导水能力而实现的。土壤属性在时间尺度上的变异性比较少,但是其在空间尺度上却有很强的变异性,如,土壤饱和导水率的大小在很短的距离内就可能出现几个数量级的变化[88],这不可避免地会导致土壤水分在空间上的变化。Hawle 等[89]在流域尺度发现土壤质地对土壤水分有显著影响。Mohanty 和 Skaggs[1]利用遥感足迹数据研究不同土壤类型下 0—5 cm 土壤水分的时间稳定性,发现沙壤土的时间稳定性特征好于粉壤土。Hu 等[31]在一个面积为 20 hm^2 的流域内利用中子仪测定获得的 0—80 cm 的土壤水分,却发现砂土样点的时间稳定性显著强于沙壤和粉壤土,而沙壤土和粉壤土样点之间的时间稳定性特征无显著差别。Zhao 等[63]利用 Pearson 相关分析在内蒙古平坦草原检验了土壤属性和时间稳定性指标(MRD)之间的关系,发现土壤属性对时间稳定性有重要影响,其中砂粒含量和有机质含量比粘粒含量和容重在控制时间稳定性方面有更大的作用。Gao 等[56]对黄土高原小流域坡地枣林 0—60 cm 土壤水分的时间稳定性特征进行了分析,发现对研究区土壤水分模拟效果最好的代表性样点为相对粘粒含量较高、坡度较平缓、地表较平滑的点,这与 Grayson 和 Western[61]和 Jacobs 等[64]部分研究结果一致。不同研究区土壤和地形等因素对土壤水分时间变异和稳定性的影响不同,因此探索主要影响因素如采样设计、地形、土壤、植被、气候等的单一及综合作用对不同区域土壤水分时间稳定性研究也将是今后研究的重点。

植被对土壤水分动态有着重要的作用,因为植被不仅可以改变土壤的入渗和持水能力,而且可以通过减小蒸发和根系吸水改变土壤水分含量和分布[90-91]。与土壤和地形因子比较,植被随时间变化性更强,因而植被对土壤水分的影响有强烈的季节依赖性。Hupet 和 Vanclooster[90]发现玉米生长期对土壤水分的变异性有不可忽视的作用。Hawley 等[89]研究发现植被的出现降低了地形对土壤水分变异性的影响。Kamgar 等[47]利用 Spearman 秩序相关系数法,发现根系活动会使得土壤水分稳定性减弱。Schneider 等[55]也发现放牧管理和

植被盖度是相对平坦的半干旱草原土壤水分稳定性的主要影响因素。然而,在较大的尺度上土地覆盖或者植被对土壤水分的空间分布影响有限[21]。由于土壤水分稳定性和植被格局稳定性反馈机制的存在,会使得植被和土壤水分变异性的"因果效应"关系更加复杂[92-93]。Teuling 和 Troch[94]发现在非胁迫的条件下,生长季植被可以增加土壤水分的变异性,但是在土壤水分低于一个特定的阈值并且蒸散主要受制于供给和土壤控制的时候,植被会降低土壤水分的变异性。Zhao 等[63]发现植被的出现让土壤水分动态变得更加复杂,进一步地,Gómez-Plaza 等[68]指出植被覆盖的变化会降低土壤水分的时间稳定性,他们发现当植被处于生长期时,土壤水分的时间模式比较弱,而当冬季植被停止生长时,土壤水分的时间稳定性增强。Mohanty 和 Skaggs[1]发现土壤水分时间稳定性的变化程度依赖于植被盖度和地形条件。Jia 和 Shao[73]分析研究了神木六道沟小流域农地、撂荒地、苜蓿地和柠条地 4 种植被类型下土壤储水量的时间稳定性特征,发现苜蓿草地时间稳定性最强,且植被盖度和地上部生物量是主要影响因素。Jia 等[81]对黄土高原典型坡面草地土壤储水量时间稳定性分析结果表明,除了土壤质地、海拔外,植被生物量和凋落物量对剖面土壤储水量时间稳定性也有显著影响。然而如果在一个相对稳定的生态系统并且测定周期一致的情况下,植被对土壤水分稳定性的影响会降低,例如 Hu 等[31]在流域尺度内分析了砂壤和粉壤土中长芒草和柠条的时间稳定性特征,发现这两种植被的时间稳定性指标没有显著差异,类似地,Vachaud 等[45]在一个随季节变化轻微的均匀草地中研究土壤水分时,发现了很强的间稳定性。可见,植被对土壤水分时间稳定性的影响主要取决于测定时间以及植被特征。

土壤水分时间稳定性还具有深度依赖性和空间尺度依赖性。通常情况下,深层土壤水分时间稳定性较浅层土壤水分更强[31,54,58,81]。冉有华等[95]对黑河流域土壤水分进行了时间稳定性分析,发现表层土壤水分最不稳定,40 cm 深度以下基本稳定。Heathman 等[62]对美国大平原南部地区土壤水分时间稳定性分析结果也表明大部分地区的表层水分稳定性不如剖面土壤水分。然而,Hu 等[31]在黄土高原六道沟小流域发现表层土壤水分(0—20 cm)时间稳定性较深层土壤水分更强,这可能与研究尺度和观测季节不同有关。许多研究者发现土壤水分时间稳定性的影响因素依赖于研究尺度[52,68,82],即采样密度、研究区面积不同,得到的影响水分时间稳定性的主要因素也不相同。在土壤水分空间变异性存在尺度依赖性的启发下,Kachanosk 和 de Jong[52]提出时间稳定性的尺度性问题,并对样带土壤储水量的空间依赖性进行了研究。Gómez-Plaza 等[68]进一步分析了样带尺度内不同空间尺度下 0—20 cm 土壤含水量的时间稳定性的控制性因子。Biswas 和 Si[82]用小波分析的方法研究了样带尺度内土壤储水量在不同尺度下的控制因子,不同的是他们发现海拔对土壤水分的影响在每一种尺度下都是最重要的。在二维尺度上时间稳定性的尺度性也被广大学者所研究,但是得出的结论却不尽相同。Schneider 等[55]和 Brocca 等[37]认为随着采样尺度的增加,由于增加了由土壤、地形和植被引起的变异性,会导致时间稳定性指标(MRD 的极差)增大。例如,在较小研究区 Grayson 和 Western[61]、Comegna 和 Basile[46]发现 MRD 的极差均小于 40%,Cosh 等[49]、Martínez\Fernández 和 Ceballos[51]分别在 150 km^2和 1285 km^2的区域内研究发现 MRD 的极差较大,两个研究区的 MRD 的极差都达到了 100%,有的甚至超过了 200%。然而,Cosh 等[96]在一个面积与 Cosh 等[49]相差不多并且采样深度相似的研究中发现 MRD 的极差仅 50%;在坡面尺度上,Jia 等[81]却发现深层土壤水分的 MRD 的极差超过 100%。土壤水分时间稳定性的其他指标如 SDRD 和 Spearman 秩相关系数与 MRD 的情况类似。相关学者将这些差异归因于不同的实验安排、测定技术以及由地形、土壤、植被等引起的差异[68,70]。显然,通过这样简单的比较来获得采样尺度对时间稳定性指标的定量关系是不现实的,因为,不同的研究之间不仅采样尺度发生变化,同时其他与土壤水分时间稳定性相关的因素随着试验位置和时间也在发生变化,很难将采样尺度引起的时间稳定性指标的变化与其他相关因素带来的变化区分开来,因此,时间稳定性的尺度性需要更加深入系统的研究。

4 展望

自 Vachaud 等[45]将时间稳定性的概念提出以来,该概念已被广泛认识并应用于不同尺度、不同测定周期、不同采样设计和方法、不同生态系统类型、不同气候区的土壤水分研究,并取得了重要进展。但是由于影

响土壤水分时间稳定性的因素较为复杂,同时土壤水分时间稳定性还具有强烈的季节、深度和空间尺度依赖性,致使相关研究结果存在一定的区域差异,有的甚至相互矛盾。根据不同研究中存在的问题和目前生态水文学发展需求,提出几点未来研究中的努力方向:

(1)多因素综合作用的研究。土壤水分时间稳定性受到气候、地形、植被和土壤属性的综合影响。但总体来讲,一些研究仍然存在一些矛盾的结论,并且缺乏一些对时间稳定性影响的潜在控制因子如土壤水力性质和测定时期边界条件如降水和蒸散的异质性或者同质性的探讨[70]。许多研究也表明土壤水分时间稳定性受到控制因子的混合作用而不是单一因子的作用。因此,借助于相关统计模型(如:时空统计模型)可能会实现对影响土壤水分稳定性各种因子相互作用的进一步探索,并且对影响因子的时空组成加以区分。

(2)尺度推绎。土壤水分时间稳定性具有强烈空间尺度依赖性,尺度问题也已成为当今生态水文学研究中的一个焦点和难点。如何从坡面或者小流域尺度上的研究结论推绎到大流域,这对验证遥感获得的土壤水分数据和估计区域尺度的土壤水分至关重要。然而近几年土壤水分时间稳定性研究中也出现了一些跨尺度方法,如通过随机抽样分析、最优组合分析、时间稳定性分析以及时间平滑相关分析等方法[97],将点尺度或者较小尺度上的数据上推到区域尺度,有效解决了较大时空尺度上相关信息收集、处理和验证问题,从而为解决尺度问题提供了重要的技术手段和方向。然而,在大区域的尺度性研究过程中采集所需要的大量数据非常困难,需要消耗大量的人力和物力,并且用传统方法在大的区域进行采样需要较长的周期,因此将“3S”技术、计算机模拟和野外实测有机的结合起来是未来研究尺度问题的一个方向。

(3)代表性测点的高效选择。基于土壤水分的相关变量来先验地鉴定代表性测点还没有定论,研究者之间的发现甚至是相互矛盾的。土壤水分的相对差分的空间变异性(极差范围)通常会随着采样范围的增加而增大。虽然找到时间稳定性测点对研究区土壤水分进行持续监测是土壤水分时间稳定性的重要应用之一,但是随着尺度的增加,估计土壤水分均值的最佳代表性测点能否在空间上保持不变亦或者是在哪种尺度上改变,仍然是一个未解决的问题[70]。此外,在数据有限的情况下,如何快速高效的找出代表性测点也应是未来研究的重要内容之一。

(4)植被恢复区和气候敏感区的研究与应用。时间稳定性概念已经在不同植被类型以及气候区进行了大量的研究,然而随着全球气候变化,林线上升,林线附近区域土壤水分受气候变化比较敏感,研究该区域的土壤水分稳定性可以为该区域植被对全球气候变化的适宜性评价以及未来发展预测等提供理论借鉴。此外,大规模的植被恢复工程在我国已经陆续实施,如何通过研究适宜植被恢复区的土壤水分时间稳定性,并快速的找出代表该区域平均土壤水分的测点位置,从而用于指导植被恢复重建,将是未来研究的热点。

参考文献(References):

[1] Mohanty B P, Skaggs T H. Spatio-temporal evolution and time-stable characteristics of soil moisture within remote sensing footprints with varying soil, slope, and vegetation. Advances in Water Resources, 2001, 24(9/10): 1051-1067.

[2] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, Hirschi M, Jaeger E B, Lehner I, Orlowsky B, Teuling A J. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: a review. Earth-Science Reviews, 2010, 99(3/4): 125-161.

[3] 杨涛, 宫辉力, 李小娟, 赵文吉, 孟丹. 土壤水分遥感监测研究进展. 生态学报, 2010, 30(22): 6264-6277.

[4] Cheema M J M, Bastiaanssen W G M, Rutten M M. Validation of surface soil moisture from AMSR-E using auxiliary spatial data in the transboundary Indus Basin. Journal of Hydrology, 2011, 405(1/2): 137-149.

[5] Legates D R, Mahmood R, Levia D F, DeLiberty T L, Quiring S M, Houser C, Nelson F E. Soil moisture: a central and unifying theme in physical geography. Progress in Physical Geography, 2011, 35(1): 65-86.

[6] Lü Y H, Fu B J, Wei W, Yu X B, Sun R H. Major ecosystems in China: dynamics and challenges for sustainable management. Environmental Management, 2011, 48(1): 13-27.

[7] Wang L, D'Odorico P, Evans J P, Eldridge D J, McCabe M F, Caylor K K, King E G. Dryland ecohydrology and climate change: critical issues and technical advances. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(8): 2585-2603.

[8] Wang X P, Pan Y X, Zhang Y F, Dou D Q, Hu R, Zhang H. Temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture for a transect in

artificial revegetation desert area, China. Journal of Hydrology, 2013, 507: 100-109.

[9] Zhao W W, Fu B J, Qiu Y. An upscaling method for cover-management factor and its application in the Loess Plateau of China. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2013, 10(10): 4752-4766.

[10] Yang L, Wei W, Chen L, Jia F, Mo B. Spatial variations of shallow and deep soil moisture in the semi-arid Loess Plateau, China. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(9): 3199-3217.

[11] Noy-Meir I. Desert ecosystems: environment and producers. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 25-51.

[12] Tallon L K, Si B C. Representative soil water benchmarking for environmental monitoring. Journal of Environmental Informatics, 2004, 4(1): 28-36.

[13] Hu W, Shao M A, Wang Q J, Reichardt K. Time stability of soil water storage measured by neutron probe and the effects of calibration procedures in a small watershed. CATENA, 2009, 79(1): 72-82.

[14] He Z B, Zhao W Z, Liu H, Chang X X. The response of soil moisture to rainfall event size in subalpine grassland and meadows in a semi-arid mountain range: a case study in northwestern China's Qilian Mountains. Journal of Hydrology, 2012, 420-421: 183-190.

[15] Ivanov V Y, Fatichi S, Jenerette G D, Espeleta J F, Troch P A, Huxman T E. Hysteresis of soil moisture spatial heterogeneity and the "homogenizing" effect of vegetation. Water Resources Research, 2010, 46(9): W09521.

[16] Yang L, Chen L D, Wei W. Effects of vegetation restoration on the spatial distribution of soil moisture at the hillslope scale in semi-arid regions. CATENA, 2015, 124: 138-146.

[17] Starks P J, Heathman G C, Jackson T J, Cosh M H. Temporal stability of soil moisture profile. Journal of Hydrology, 2006, 324(1/4): 400-411.

[18] Longobardi A. Observing soil moisture temporal variability under fluctuating climatic conditions. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2008, 5(2): 935-969.

[19] Jin T T, Fu B J, Liu G H, Wang Z. Hydrologic feasibility of artificial forestation in the semi-arid Loess Plateau of China. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(8): 2519-2530.

[20] Wilson D J, Western A W, Grayson R B. A terrain and data-based method for generating the spatial distribution of soil moisture. Advances in Water Resources, 2005, 28(1): 43-54.

[21] Venkatesh B, Lakshman N, Purandara B K, Reddy V B. Analysis of observed soil moisture patterns under different land covers in western Ghats, India. Journal of Hydrology, 2011, 397(3/4): 281-294.

[22] Jia Y H, Shao M A. Dynamics of deep soil moisture in response to vegetational restoration on the Loess Plateau of China. Journal of Hydrology, 2014, 519: 523-531.

[23] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, Western A W, Vertessy R A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. Journal of Hydrology, 2005, 310(1/4): 28-61.

[24] Ursino N, Contarini S. Stability of banded vegetation patterns under seasonal rainfall and limited soil moisture storage capacity. Advances in Water Resources, 2006, 29(10): 1556-1564.

[25] Vivoni E R, Gebremichael M, Watts C J, Bindlish R, Jackson T J. Comparison of ground-based and remotely-sensed surface soil moisture estimates over complex terrain during SMEX04. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 314-325.

[26] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子. 生态学报, 2012, 32(16): 4961-4968.

[27] Fu B J, Wang J, Chen L D, Qiu Y. The effects of land use on soil moisture variation in the Danangou catchment of the Loess Plateau, China. CATENA, 2003, 54(1/2): 197-213.

[28] Jackson R B, Jobbágy E G, Avissar R, Roy S B, Barrett D J, Cook C W, Farley K A, Le Maitre D C, McCarl B A, Murray B C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. Science, 2005, 310(5756): 1944-1947.

[29] 程立平, 刘文兆, 李志. 黄土塬区不同土地利用方式下深层土壤水分变化特征. 生态学报, 2014, 34(8): 1975-1983.

[30] 索立柱, 黄明斌, 段良霞, 张永坤. 黄土高原不同土地利用类型土壤含水量的地带性与影响因素. 生态学报, 2017, 37(6): 2045-2053.

[31] Hu W, Shao M G, Han F P, Reichardt K, Tan J. Watershed scale temporal stability of soil water content. Geoderma, 2010, 158(3/4): 181-198.

[32] Heathman G C, Cosh M H, Merwade V, Han E J. Multi-scale temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture within the Upper Cedar Creek Watershed, Indiana. CATENA, 2012, 95: 91-103.

[33] Vereecken H, Kamai T, Harter T, Kasteel R, Hopmans J, Vanderborght J. Explaining soil moisture variability as a function of mean soil moisture: a stochastic unsaturated flow perspective. Geophysical Research Letters, 2007, 34(22): L22402.

[34] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas. Journal of Hydrology, 1998, 210(1/4): 259-281.

[35] Pietroniro A, Soulis E D, Kouwen N. Deriving antecedent moisture conditions from airborne SAR for input into a flood forecasting model// Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis

and Interpretation. Pasadena, CA, USA: IEEE, 1994, 3: 1435-1438.

[36] Wagner W, Blöschl G, Pampaloni P, Calvet J C, Bizzarri B, Wigneron J P, Kerr Y. Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. Hydrology Research, 2007, 38(1): 1-20.

[37] Brocca L, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy. Geoderma, 2009, 148(3/4): 364-374.

[38] Brocca L, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. Spatial - temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. Water Resources Research, 2010, 46(2): W02516.

[39] Brocca L, Tullo T, Melone F, Moramarco T, Morbidelli R. Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability. Journal of Hydrology, 2012, 422-423: 63-75.

[40] Zucco G, Brocca L, Moramarco T, Morbidelli R. Influence of land use on soil moisture spatial-temporal variability and monitoring. Journal of Hydrology, 2014, 516: 193-199.

[41] Brocca L, Morbidelli R, Melone F, Moramarco T. Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. Journal of Hydrology, 2007, 333(2/4): 356-373.

[42] Henninger D L, Petersen G W, Engman E T. Surface soil moisture within a watershed——variations, factors influencing, and relationship to surface runoff. Soil Science Society of America Journal, 1976, 40(5): 773-776.

[43] Qiu Y, Fu B J, Wang J, Chen L D. Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2001, 240(3/4): 243-263.

[44] Ibrahim H M, Huggins D R. Spatio-temporal patterns of soil water storage under dryland agriculture at the watershed scale. Journal of Hydrology, 2011, 404(3/4): 186-197.

[45] Vachaud G, De Silans A P, Balabanis P, Vauclin M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. Soil Science Society of America Journal, 1985, 49(4): 822-828.

[46] Comegna V, Basile A. Temporal stability of spatial patterns of soil water storage in a cultivated Vesuvian soil. Geoderma, 1994, 62(1/3): 299-310.

[47] Kamgar A, Hopmans J W, Wallender W W, Wendroth O. Plotsize and sample number for neutron probe measurements in small field trials. Soil Science, 1993, 156(4): 213-224.

[48] Coppola A, Comegna A, Dragonetti G, Lamaddalena N, Kader A M, Comegna V. Average moisture saturation effects on temporal stability of soil water spatial distribution at field scale. Soil and Tillage Research, 2011, 114(2): 155-164.

[49] Cosh M H, Jackson T J, Moran S, Bindlish R. Temporal persistence and stability of surface soil moisture in a semi-arid watershed. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 304-313.

[50] Da Silva A P, Nadler A, Kay B D. Factors contributing to temporal stability in spatial patterns of water content in the tillage zone. Soil and Tillage Research, 2001, 58(3/4): 207-218.

[51] Martínez-Fernández J, Ceballos A. Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(6): 1647-1656.

[52] Kachanoski R G, de Jong E. Scale dependence and the temporal persistence of spatial patterns of soil water storage. Water Resources Research, 1988, 24(1): 85-91.

[53] Chen Y J. Letter to the editor on "rank stability or temporal stability". Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(1): 306-306.

[54] Guber A K, Gish T J, Pachepsky Y A, van Genuchten M T, Daughtry C S T, Nicholson T J, Cady R E. Temporal stability in soil water content patterns across agricultural fields. CATENA, 2008, 73(1): 125-133.

[55] Schneider K, Huisman J A, Breuer L, Zhao Y, Frede H G. Temporal stability of soil moisture in various semi-arid steppe ecosystems and its application in remote sensing. Journal of Hydrology, 2008, 359(1/2): 16-29.

[56] Gao X D, Wu P T, Zhao X N, Shi Y G, Wang J W. Estimating spatial mean soil water contents of sloping jujube orchards using temporal stability. Agricultural Water Management, 2011, 102(1): 66-73.

[57] 赵培培. 黄土高原小流域典型坝地土壤水分和泥沙空间分布特征[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.

[58] Gao L, Shao M G. Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. CATENA, 2012, 95: 24-32.

[59] Martínez G, Pachepsky Y A, Vereecken H. Temporal stability of soil water content as affected by climate and soil hydraulic properties: a simulation study. Hydrological Processes, 2014, 28(4): 1899-1915.

[60] Hu W, Shao M G, Reichardt K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 762-773.

[61] Grayson R B, Western A W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response. Journal of Hydrology, 1998, 207(1/2): 68-82.

[62] Heathman G C, Larose M, Cosh M H, Bindlish R. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA. CATENA, 2009, 78(2): 159-169.

[63] Zhao Y, Peth S, Wang X Y, Lin H, Horn R. Controls of surface soil moisture spatial patterns and their temporal stability in a semi - arid steppe. Hydrological Processes, 2010, 24(18): 2507-2519.

[64] Jacobs J M, Mohanty B P, Hsu E C, Miller D. SMEX02: field scale variability, time stability and similarity of soil moisture. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 436-446.

[65] 高磊. 黄土高原小流域土壤水分时间稳定性及空间尺度性研究[D]. 杨凌: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.

[66] Van Pelt R S, Wierenga P J. Temporal stability of spatially measured soil matric potential probability density function. Soil Science Society of America Journal, 2001, 65(3): 668-677.

[67] Martínez-Fernández J, Ceballos A. Mean soil moisture estimation using temporal stability analysis. Journal of Hydrology, 2005, 312(1/4): 28-38.

[68] Gómez-Plaza A, Alvarez-Rogel J, Albaladejo J, Castillo V M. Spatial patterns and temporal stability of soil moisture across a range of scales in a semi-arid environment. Hydrological Processes, 2000, 14(7): 1261-1277.

[69] Rolston D E, Biggar J W, Nightingale H I. Temporal persistence of spatial soil-water patterns under trickle irrigation. Irrigation Science, 1991, 12(4): 181-186.

[70] Vanderlinden K, Vereecken H, Hardelauf H, Herbst M, Martínez G, Cosh M H, Pachepsky Y A. Temporal stability of soil water contents: a review of data and analyses. Vadose Zone Journal, 2012, 11(4): 1-12.

[71] de Rosnay P, Gruhier C, Timouk F, Baup F, Mougin E, Hiernaux P, Kergoat L, LeDantec V. Multi-scale soil moisture measurements at the Gourma meso-scale site in Mali. Journal of Hydrology, 2009, 375(1/2): 241-252.

[72] Gao L, Shao M A. Temporal stability of shallow soil water content for three adjacent transects on a hillslope. Agricultural Water Management, 2012, 110: 41-54.

[73] Jia X X, Shao M A, Wei X R, Wang Y Q. Hillslope scale temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. Journal of Hydrology, 2013, 498: 254-264.

[74] Pachepsky Y A, Guber A K, Jacques D. Temporal persistence in vertical distributions of soil moisture contents. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(2): 347-352.

[75] Dumedah G, Coulibaly P. Evaluation of statistical methods for infilling missing values in high-resolution soil moisture data. Journal of Hydrology, 2011, 400(1/2): 95-102.

[76] Lin H. Temporal stability of soil moisture spatial pattern and subsurface preferential flow pathways in the Shale Hills Catchment. Vadose Zone Journal, 2006, 5(1): 317-340.

[77] 朱首军, 丁艳芳, 薛泰谦. 农林复合生态系统土壤水分空间变异性和时间稳定性研究. 水土保持研究, 2000, 7(1): 46-48.

[78] Shen Q, Gao G Y, Hu W, Fu B J. Spatial-temporal variability of soil water content in a cropland-shelterbelt-desert site in an arid inland river basin of Northwest China. Journal of Hydrology, 2016, 540: 873-885.

[79] Zhang P P, Shao M A. Temporal stability of surface soil moisture in a desert area of northwestern China. Journal of Hydrology, 2013, 505: 91-101.

[80] Liwata P, Hänninen P, Okkonen J, Sutinen R. Time-stability of soil water through boreal(60-68°N) gradient. Journal of Hydrology, 2014, 519: 1584-1593.

[81] Jia Y H, Shao M A, Jia X X. Spatial pattern of soil moisture and its temporal stability within profiles on a loessial slope in northwestern China. Journal of Hydrology, 2013, 495: 150-161.

[82] Biswas A, Si B C. Identifying scale specific controls of soil water storage in a hummocky landscape using wavelet coherency. Geoderma, 2011, 165(1): 50-59.

[83] Liu B X, Shao M A. Estimation of soil water storage using temporal stability in four land uses over 10 years on the Loess Plateau, China. Journal of Hydrology, 2014, 517: 974-984.

[84] Penna D, Brocca L, Borga M, Fontana G D. Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods. Journal of Hydrology, 2013, 477: 55-71.

[85] 朱青, 史伯强, 廖凯华. 基于聚类和时间稳定性的土壤含水量优化监测. 土壤通报, 2015, 46(1): 74-79.

[86] de Souza E R, de Assunção Montenegro A A, Montenegro S M G, de Arimatea de Matos J. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in northeast Brazil. Agricultural Water Management, 2011, 99(1): 26-32.

[87] 贾小旭. 典型黄土区土壤水分布及其对草地生态系统碳过程的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.

[88] Sobieraj J A, Elsenbeer H, Cameron G. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. CATENA, 2004, 55(1): 49-77.

[89] Hawley M E, Jackson T J, McCuen R H. Surface soil moisture variation on small agricultural watersheds. Journal of Hydrology, 1983, 62(1/4): 179-200.

[90] Hupet F, Vanclooster M. Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field. Journal of Hydrology, 2002, 261(1/4): 86-101.

[91] 邹慧, 高光耀, 傅伯杰. 干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展. 生态学报, 2016, 36(11): 3127-3136.

[92] Cantón Y, Solé-Benet A, Domingo F. Temporal and spatial patterns of soil moisture in semiarid badlands of SE Spain. Journal of Hydrology, 2004, 285(1/4): 199-214.

[93] Ruiz-Sinoga J D, Martínez-Murillo J F, Gabarrón-Galeote M A, García-Marín R. The effects of soil moisture variability on the vegetation pattern in Mediterranean abandoned fields(Southern Spain). CATENA, 2011, 85(1): 1-11.

[94] Teuling A J, Troch P A. Improved understanding of soil moisture variability dynamics. Geophysical Research Letters, 2005, 32(5): L05404.

[95] 冉有华, 李新, 王维真, 晋锐. 黑河流域临泽盐碱化草地网格尺度多层土壤水分时空稳定性分析. 地球科学进展, 2009, 24(7): 817-824.

[96] Cosh M H, Jackson T J, Bindlish R, Prueger J H. Watershed scale temporal and spatial stability of soil moisture and its role in validating satellite estimates. Remote Sensing of Environment, 2004, 92(4): 427-435.

[97] Chen J L, Wen J, Tian H. Representativeness of the ground observational sites and up-scaling of the point soil moisture measurements. Journal of Hydrology, 2016, 533: 62-73.